



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ENERGIAPURISTIN

TEKIJÄ/T: Matti Kakko

| | | |
|---|--------------------|----|
| Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala | | |
| Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma | | |
| Työn tekijä(t) Matti Kakko | | |
| Työn nimi Energiapuristin | | |
| Päiväys | Sivumäärä/Liitteet | 31 |
| Ohjaaja(t) Lehtori Pertti Kupiainen | | |
| Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Suunnittelutoimisto Kimmer | | |
| <p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää energiapuun puristamisen mahdollisuuksia. Työssä tutustuttiin energia-alalla käytettäviin menetelmiin sekä selvitettiin alan toimintaympäristöä. Lisäksi vertailtiin eri menetelmien hyötyjä ja haittoja sekä etsittiin sovellusmahdollisuuksia nykyisistä menetelmistä.</p> <p>Energiapuun puristamiseen ei ole tällä hetkellä menetelmiä. Puristimen suunnittelulle pyrittiin löytämään perusteluja puun kiertonopeuden paranemisesta ja logistisesta tehokkuudesta. Työssä selvitettiin vaiheittain puristimen työkiertoa ja mitä teknisiä menetelmiä eri vaiheissa voidaan hyödyntää. Työssä havaittiin että puu tulisi esimurskata ennen puristusta, minkä jälkeinen puristustyökierto olisi kolmevaiheinen.</p> <p>Työssä tehtiin puristustestejä erilaisilla puulajeilla. Testejä varten valmistettiin puristinta kuvaava testilaitte. Koossa pysyvää puristetta ei saatu syntymään mutta työssä havaittiin merkittävää kosteuden poistumista puusta. Jatkossa tarvitaan lisää kehitystyötä siitä, päästäänkö puristuksen avulla tehokkaaseen ja taloudelliseen lopputulokseen.</p> | | |
| Avainsanat energiapuu, energia-alan toimintaympäristö, kiertonopeus | | |
| Julkinen | | |

| | | | |
|--|--|------------------|--|
| Field of Study Technology, Communication and Transport | | | |
| Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering | | | |
| Author(s) Matti Kakko | | | |
| Title of Thesis Energy pressing equipment | | | |
| Date | | Pages/Appendices | |
| Supervisor(s) Mr Pertti Kupiainen, Senior lecturer, Savonia University of Applied Sciences | | | |
| Client Organisation /Partners Suunnittelutoimisto Kimmer | | | |
| <p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to research the potential of energy wood pressing and to study the operational environment of energy industry and technology. This way it was possible to compare the benefits and disadvantages and find the most suitable potential application.</p> <p>Currently there is not any technology for energy wood pressing. The aim was to find out how the energy pressing equipment should be planned. Based on the annual circulation of wood and the effectivity of logistics, wood should be crushed before pressing. The next operation would be pressing in which the press rotation would happen at three stages.</p> <p>In this project the experiments were done with a test machine made for this purpose. The machine was to represent the right pressing. In the experiments it was noticed that wood lost its moisture but the pressed piece was not cohesive. This project that showed a follow-up research and further development need to be done to make the pressing process more effective and economical.</p> | | | |
| Keywords energy wood, operation environment of the energy, circulation of the wood | | | |
| public | | | |

SISÄLTÖ

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 6 |
| 2 | METSIEN KÄYTTÖ SUOMESSA | 7 |
| 2.1 | Puunkäytön historiaa..... | 7 |
| 2.2 | Puunkäyttö nykyään..... | 8 |
| 2.2.1 | Raakapuun käyttö | 8 |
| 2.2.2 | Energiapuun käyttö | 9 |
| 2.3 | Puumarkkinat | 9 |
| 2.3.1 | Puun ostajat | 9 |
| 2.3.2 | Puun myyjät | 10 |
| 2.4 | Puukaupan eri muodot | 10 |
| 2.5 | Valtion tuki energiapuulle | 11 |
| 3 | ENERGIA-ALAN MENETELMIEN MÄÄRITTELY | 12 |
| 3.1 | Energiapuun korjuu..... | 12 |
| 3.2 | Haketus ja murskaustekniikka..... | 13 |
| 3.2.1 | Rumpuhakkurit | 13 |
| 3.2.2 | Laikkahakkurit..... | 13 |
| 3.3 | Kuljetinlaitteet | 14 |
| 3.3.1 | Eri kuljetintyypit | 14 |
| 3.3.2 | Syöttölaitteet | 14 |
| 3.4 | Murskaus ja murskaimet..... | 15 |
| 3.4.1 | Vasaramurskamet | 15 |
| 3.4.2 | Hidaskierrosmurskaimet | 15 |
| 3.5 | Logistiikka | 16 |
| 3.5.1 | Tienvarsihaketus | 16 |
| 3.5.2 | Terminaalihaketus ja murskaus | 16 |
| 3.6 | Kiertonopeus | 17 |
| 4 | ENERGIAPUUNPURISTIMEN SUUNNITTELUN PERUSTEET | 18 |
| 4.1 | Suunnittelun lähtökohdat..... | 18 |
| 4.1.1 | Puristettava raaka-aine..... | 18 |
| 4.1.2 | Tekniset sovellukset | 19 |
| 4.2 | Puun kierto puristamisprosessin yhteydessä | 19 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.3 | Puristusmenetelmän hyödyt ja haitat..... | 20 |
| 5 | PURISTIMEN ESISUUNNITTELU..... | 21 |
| 5.1 | Puun syöttö, esimurskaus ja kuljetus..... | 21 |
| 5.1.1 | Telamurskaus | 21 |
| 5.1.2 | Leukamurskain..... | 22 |
| 5.1.3 | Puun syöttö murskaimelle | 22 |
| 5.1.4 | Murskainterien rakenne | 23 |
| 5.1.5 | Murskeen kuljetus puristimeen..... | 24 |
| 5.2 | Puristimen suunnittelu..... | 24 |
| 5.2.1 | Puun rakenne puristumisen näkökulmasta | 24 |
| 5.2.2 | Puristinkammion rakenne | 25 |
| 5.2.3 | Puristimen työkierto | 25 |
| 6 | KOETULOKSET | 27 |
| 6.1 | Testilaitteisto..... | 27 |
| 6.2 | Puristettavat puulajit | 27 |
| 6.2.1 | Tuore lehtipuu | 27 |
| 6.2.2 | Havupuuhake..... | 28 |
| 6.3 | Päätelmät testitulosten perusteella..... | 28 |
| 6.4 | Jatkokehitys | 29 |
| 7 | YHTEENVETO..... | 30 |
| | LÄHTEET..... | 31 |

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on energiapuupuristimen suunnittelun esiselvitys. Puun energiakäytön lisääminen on tulevana vuosina välttämätöntä. Kotimaisen energian käytöllä voidaan saavuttaa merkittäviä työllisyysvaikutuksia sekä parantaa Suomen energiaomavaraisuutta ja näin vähentää fossiilisten tuontipolttoaineiden käyttöä.

Opinnäytetyössä selvitetään energia-alan nykyistä toimintaympäristöä energiapuun kiertoon liittyvien organisaatioiden, teknisten menetelmien ja kilpailukyvyn kannalta. Näin voidaan verrata energiapuun puristamisella saavutettavia hyötyjä ja haittoja nykyisiin menetelmiin ja toimintatapoihin.

Opinnäytetyössä pyritään löytämään alustavasti tekniset ratkaisut energiapuupuristimen suunnittelulle ja saamaan tietoa myöhempää kustannuslaskentaa varten. Puristimen tekniikassa hyödynnetään mahdollisuuksien mukaan olemassa olevaa tekniikkaa, jota voidaan soveltaa käyttötarkoituksen mukaan. Opinnäytetyön tavoitteena on saavuttaa energiapuupuristimen myöhemmälle valmistussuunnittelulle riittävä pohja sekä selvittää, onko hankkeen toteuttaminen mahdollista.

2 METSIEN KÄYTTÖ SUOMESSA

Suomi on metsäinen ja harvaan asuttu maa: maapinta-alasta 75 % on metsien peitossa. Suomessa puuta on käytetty eri tarkoituksiin koko asutushistorian ajan ja metsät ovat tarjonneet elinkeinoja ja työtä suomalaisille vuosisatoja. Puunkäyttö energiaksi on lisääntynyt teollistumisen myötä. Fossiilisten polttoaineiden vähentyessä uusiutuvan metsäenergian käyttö kasvaa tulevien vuosien aikana.

2.1 Puun käytön historiaa

Suomalaiset ovat käyttäneet metsiä koko asutushistorian ajan. Metsät ovat tarjonneet tuhansien vuosien ajan riistaa sekä poltto- ja rakennuspuuta. On arvioitu, että metsiä kaskettiin viljelysmaiksi jo 4000 vuotta sitten. Metsien varsinainen taloudellinen hyödyntäminen alkoi tervanpolton myötä 1600-luvulla, jolloin havupuista saatavasta tervasta tuli tärkeä vientituote. Samaan aikaan puuta alettiin käyttämään lisääntyvään raudan ja kuparin valmistukseen, kun puuhiiltä käytettiin masuuneissa malmin sulattamiseen. Suomeen syntyi varhaisia teollisuuden keskittymiä eli ruukkeja vesistöjen läheisyyteen. Sahoja perustettiin erityisesti 1700-luvulla koskien äärelle, näistä saatavan vesivoiman vuoksi. Monet näistä ruukki- ja sahapaikkakunnista ovat vielä nykyisinkin merkittäviä teollisuuspaikkakuntia.

Metsien käyttö oli 1800-luvulle tultaessa hyvin vapaata ja tuhlailevaista, sillä metsistä hyödynnettiin usein vain parhaat tukkipuut. Kaskeaminen aiheutti myös metsien laadun heikkenemistä, sillä metsät uusiutuivat vain luonnostaan. 1900-luvulle tultaessa ulkomaiset metsäalan ammattilaiset huolestuivat Suomen hupenevien metsävarojen kohtalosta, kuten oli käynyt muualla Euroopassa jo aiemmin. Aktiivisen valistuksen ja metsänhoidon tuloksena metsien ryöstökäyttö pysähtyi ja metsät saatiin tuottamaan puuta entistä tehokkaammin teollisuuden tarpeisiin.

1800-luvulla alkanut teollistuminen johti myös Suomessa voimakkaan puunjalostus teollisuuden syntymiseen. Elintason nousu ympäri eurooppaa lisäsi paperin ja sahatavaran kysyntää. Metsistä saatavat tuotteet synnyttivät Suomeen tärkeää vientiteollisuutta. Metsät tarjosivat työtä sadoille tuhansille suomalaisille metsätöiden, puunuiton ja tehdastyön myötä. Puun myynnistä ja metsätöistä tuli myös merkittävä tulonlähde maaseudun pienille ja suurille tiloille ja on sitä vielä tänäkin päivänä. Koneellistumisen myötä 1950- ja 60-luvulla työpaikat metsissä vähenivät, mutta siitä huolimatta metsäteollisuus on ollut taloutemme selkäranka. (Tutkijoiden metsäpalaveri, 2004)

2000-luvulla Suomesta on lopetettu lukuisia sellu- ja paperitehtaita markkinoiden painopisteen siirtymässä kauemmaksi Euroopasta. Paperille painettujen julkaisuiden määrä vähenee maailmassa, mikä vaikuttaa luonnollisesti paperin kysyntään. Pakkausmateriaalin, kuten kartonigin ja muiden sellusta saatavien tuotteiden osuus puolestaan on ollut kasvussa, mistä viime ajan metsäteollisuuden investointiutiset kertovat.

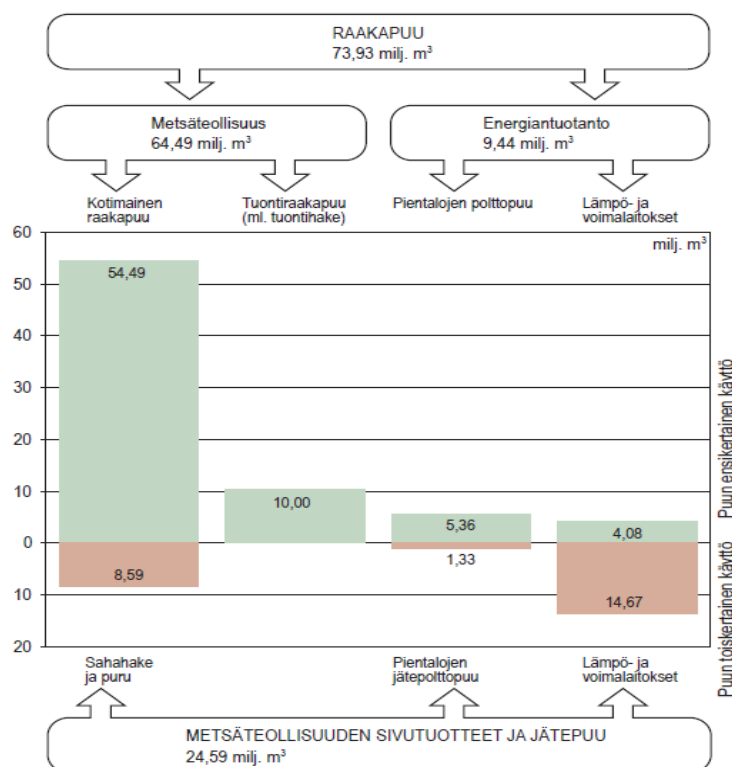
Suomi on metsineen uuden tilanteen edessä. On pyrittävä löytämään puulle uusia markkinoita erilaisina jalosteina, jotta samalla voidaan turvata metsien kannattava hoito ja laadukkaan sahatavaran tuotanto myös tulevaisuudessa.

2.2 Puunkäyttö nykyisin

Suomen metsät kasvavat puuta yli 100 miljoonaa kuutiometriä vuodessa. Metsäteollisuuden pohja on ollut viimeisen 50 vuoden ajan sahatavaran, paperin ja sellun valmistuksessa. Laadukkaan sahatavan tukin saamiseksi metsien pientä puuta on käytetty sellun ja puuhiokkeen raaka-aineena. Viimeisten vuosikymmenten aikana paperin ja sellun valmistukseen kelpaamaton pienpuu on käytetty yksityistalouksien energianlähteenä tai jätetty metsään raivauksen yhteydessä.

2.2.1 Raakapuun käyttö

Teollisuus käyttää Suomessa raakapuuta 60 - 80 miljoonaa m³/vuosi. Vuonna 2013 raakapuuta käytettiin 73,9 miljoonaa m³. Vuonna 2013 64,5 miljoonaa m³ käytettiin teollisuudessa sahattavaksi tai massa- ja paperiteollisuudessa. Teollisuuden puunkäyttö oli 87 % kaikesta raakapuun käytöstä vuonna 2013. (Kuvio 1.)



Kuva 1. Puun käyttö Suomessa 2013

KUVIO 1. Teollisuuden raakapuunkäyttö 2013 (Metsätilastotiedote 2014.)

Kuviosta 1 nähdään, kuinka raakapuunkäyttö jakaantuu. Raakapuunkäyttömäärät sisältävät myös tuontipuun.

2.2.2 Energiapuun käyttö

Vuoden 2013 tilaston perusteella 73,9 miljoonasta m³ noin 9,4 miljoonaa m³ päätyi polttoon joko lämpölaitoksiin tai kotitalouksiin. Lämpölaitoksissa käytettiin runkopuusta valmistettua metsähaketta 4,1 miljoonaa m³. Tämä määrä kasvoi edellisvuodesta 3 %. Yhteensä energiapuun käyttö lisääntyi 5 % vuonna 2013. (Metsätilastotiedote, 2014.)

Läpimitalta pienempää sellupuuta on käytetty myös energiapuuksi, mikä on aiheuttanut metsäteollisuudessa huolta puuraaka-aineen riittävyydestä sen tarpeisiin. Energiapuukohteet ovat tyypillisesti nuoren metsän hoito kohteita, jolloin ei välttämättä ole kannattavaa katkoa vähäistä kuitupuusaantoa määrämittaan. Tällöin on kannatavampaa tehdä kaikki pieniläpimittainen puu energiapuuksi.

2.3 Puumarkkinat

Suomessa käytetystä raakapuusta lähes 90 % on kotimaista. Puunosto ja myynti jakautuvat eri toimijoiden kesken. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin puumarkkinoiden jakautumista. (Kuvio 1.)

2.3.1 Puun ostajat

Merkittävimmät puunostajat Suomessa ovat kolme suurinta metsäyhtiötä: UPM-kymmene, Stora Enso sekä Metsä group. Yhtiöt omistavat myös suuria metsätiloja, joista hakattavalla puulla yhtiöt pystyvät tasaamaan omaa puunsaantiaan. Viime vuosina yhtiöt ovat kuitenkin luopuneet kauempana tuotantolaitoksista sijaitsevista metsävaroistaan.

Suomessa toimii noin 30 itsenäistä sahaa. Suomen sahat ry:n jäsenet ovat neljänneksi suurin puunostajaryhmä Suomessa. Itsenäiset sahat ostavat markkinatilanteen mukaan noin 10 miljoonaa m³ puuta vuodessa. Sahojen puunhankintaa hoitaa joko oma hankintaorganisaatio tai vaihtoehtoisesti ne ostavat puuta suuremmilta metsäyhtiöiltä tai metsänhoitoyhdistyksiltä. Sahojen puun tarve rajoittuu lähinnä tukkipuuhun, mutta ne ostavat myös kuitu- ja energiapuuta asiakassuhteiden säilyttämiseksi. Tämä puu taas myydään suoraan sellu- ja paperitehtaille. Energiapuun sahat käyttävät itse tai välittävät lämpölaitosten käyttöön. (Suomen sahat ry.)

Yksi puunostajaryhmä ovat metsänhoitoyhdistykset. Mhy:t eroavat muista ostajista siten, että niillä ei ole omia tuotantolaitoksia. Ne välittävät puuta kaikille puunostajatahoille. Nämä puunostajat ostavat lähes kaikkia puutavaralajeja koko maassa, koska ne pystyvät hyödyntämään niitä tuotantolaitoksissaan.

Energiapuuta ostavat myös lämpölaitokset. Monissa kaupungeissa ja kunnissa on pääasiassa puuta tai turvetta käyttävä yksityinen tai suuren energiayhtiön omistama lämpölaitos. On arvioitu, että tulevina vuosina uusituvaa energiaa käyttävien lämpölaitosten määrä lisääntyy, mikä tarkoittaa energiapuun tarpeen kasvamista. Lämpölaitokset hankkivat raaka-aineensa oman hankintaorganisaation tai edellä mainittujen toimien kautta. Polttoaineen hankinta on voitu kilpailuttaa ulkopuolisen toi-

mijan, kuten mhy:n hoidettavaksi. Esimerkkinä energiapuuta ostavista energiayhtiöistä voidaan mainita Vapo ja L&T Biowatti.

2.3.2 Puun myyjät

Eniten puuta myyvät yksityiset metsänomistajat. Metsätilojen keskimääräinen pinta-ala on pienentynyt viime vuosikymmeninä; se on tällä hetkellä vajaa 30 hehtaaria. On merkkejä pantavaa, että yli 60 % metsätiloista on pinta-alaltaan alle 20 hehtaaria (Suomen metsäyhdistys ry).

Metsätilojen pirstoutuminen yhä pienempiin kokonaisuuksiin tarkoittaa haasteita myös puun myynnin näkökulmasta. Koska tilakoot ovat pieniä, tehdyt puukaupat jäävät kooltaan pieniksi. Tämän vuoksi myös myytävät leimikot ovat pieniä ja tilanne on puunostajalle epävarma. Riittävä tilakoko takaa varman ja luotettavan puuntoimituksen. Lisäksi yhä useampi metsänomistaja asuu etäällä metsistään eikä ole kiinnostunut hoitamaan niitä itse. Näissä tapauksissa metsän hoidosta on vastuu saatettu antaa paikalliselle mhy:lle tai pienemälle metsäpalveluyritykselle.

Suuria puun myyjiä ovat yksityiset metsäsijoittajat, metsätalousyrittäjät ja yhteismetsät, joille metsistä saatava tulo on elinkeino. Samalla kun metsätilojen koko on pienentynyt, on voitu myös havaita, että suurten tilojen määrä on hieman kasvanut. Tilakoon pieneneminen näkyy erityisesti keskikokoisten tilojen määrän vähentymisenä.

Suuria määriä puuta myyvät myös valtio, kunnat ja seurakunnat. Koska metsäomaisuus on laaja, hoidetaan metsää järjestelmällisesti ja organisoidusti. Nämä myyjätahot kilpailuttavat puun myynnin tai niillä on sopimus takuuhinnoilla tietyn toimijan kanssa. Suuret metsänomistajat takaavat luotettavuutta puumarkkinoille ja siksi metsänomistuksen liiallinen pirstoutuminen on haitallista.

Tilakoon pieneneminen ja tietämättömyys metsähoidosta ovat suuri riski laadukkaalle metsänhoidolle. Siksi tulevien vuosien haasteena onkin taata metsänhoito jo nuoren metsän vaiheessa, jotta puun saanti on turvattu myös tulevaisuudessa. Tähän liittyvät olennaisesti kilpailukykyiset energiapuumarkkinat. Energiapuun myynnin tulee olla puun myyjälle ensisijaisesti keino turvata metsien kasvukunto tulevaisuudessa, mutta sen tulee olla myös taloudellisesti houkutteleva kannustin.

2.4 Puukaupan eri muodot

Valtaosa Suomessa tehtävistä puukaupoista toteutetaan pystykauppana, eli metsänomistaja myy puut puunostajalle ja ostaja korjaa puut metsästä oman korjuuorganisaationsa koneilla. Tällöin kuitupuun hinta on keskimäärin 10 – 17 €/ m³ puulajin ja kohteen sijainnin mukaan. Pystykaupan lisäksi puuta voidaan myydä myös hankintakaupalla, jolloin myyjä korjaa puun tienvarteen omilla kustannuksillaan joko itse tai ostopalveluna koneyritykseltä. Tällöin kuitupuun hinta on noin 30 €/ m³. Etenkin maatalousyrittäjät ovat suosineet hankintakauppaa, sillä se on tuonut lisäansioita maatalouden yhteydessä. Lisäksi pienemmät metsätalousyrittäjät käyttävät hankintakauppaa myyntitapana. Pysty- ja hankintakaupan kuutiokohtainen hintaero tukilla ei ole suuri. Tämä perustuu siihen, että puunostajan teettämän hakkuutyön kustannukset eivät muodosta tukilla niin suurta osaa, kuin

kuitupuun korjuussa harvennuksilta. Harvennuksilla konetyön kustannukset ovat myös suuremmat verrattuna saatavan raaka-aineen arvoon.

Energiapuun osalta käytössä on molempia puukaupan muotoja. Energiapuun korjuu on kaikkein työläintä. Pystykaupalla saatava puunmyyntitulo jää alle 10 €/ m³, koska konetyöstä maksettava osuus on suurempi. Jos energiapuun korjuu toteutetaan hankintakaupalla, on hinta noin 20 €/ m³. Energiapuun hinta on kuitenkin viime aikoina ollut altis vaihteluille valtion tukipolitiikan vuoksi. Kilpailukyvyn parantaminen ja riippumattomuus tuista onkin yksi energiapuukaupan suurimmista haasteista.

2.5 Valtion tuki energiapuulle

Suomen valtio on asettanut tavoitteen, että vuonna 2020 tuotetusta energiasta 38 % tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä. Tämän vuoksi valtio harjoittaa tukipolitiikkaa jolla pyritään uusiutuvan energian käytön lisäämiseen. (Maa- ja metsätalousministeriö, 2015.)

Puupohjaisten energianlähteiden tukeminen on yksi osa valtion energiapolitiikkaa. Tällä hetkellä uusiutuvat energiamuodot eivät pysty kilpailemaan fossiilisia tuontipolttoaineita vastaan ilman tukia. Puusta saatavan energian käytön lisäämiselle on perusteena edellä mainittujen tavoitteiden lisäksi kannustus metsien hoitoon ja kotimaisen energian hyödyntämisestä saatavat työllisyysvaikutukset. Valtio on tukenut nuorten metsien hoitoa kestävän metsärahoituksen eli kemera-tukien avulla. Metsänomistaja on saanut tukea nuoren metsän hoitoon 108 €/ha–294 €/ha. Tuen suuruus on perustunut puuston runkoläpimitan keskiarvoon. Lisäksi energiapuun korjuusta on maksettu korjattuihin kuutioihin perustuvaa tukea 7 €/kiinto-m³ (kasaus 3,50 €/kiinto-m³, kuljetus 3,50 €/kiinto-m³). Hankintakaupassa eli metsänomistajan itse suorittamassa korjuussa on energiapuun markkinahinta ollut viime vuonna 15 € - 23 €/ kiinto-m³. (Metsäkeskus, kemera-tuet.)

Puunostajat ovat pystyneet käyttämään hyväksi puukaupassa kemera-tukea, kun puun myyjä on saanut valtion kemera-tuen itselleen. Puunostajan kate energiapuukaupassa on lämpölaitoksen maksama hinta toimitetusta hakekuutiosta vähennettynä korjuu, haketus ja kuljetus kustannukset. Tämän ketjun tehostaminen ja kilpailukyvyn parantaminen on erittäin tärkeää, jotta energiapuu pystyy kilpailemaan muiden energianlähteiden kanssa. Vuoden 2012 loppuun myös haketukselle maksettiin tukea noin 4 €/ m³. Kemera-tuen jatkosta ei ole tällä tarkkaa tietoa. Kemeralain odotetaan uudistuvan 2015 aikana. (Metsäkeskus, metsätaloudentuet, 2014)

3 ENERGIA-ALAN MENETELMIEN MÄÄRITTELY

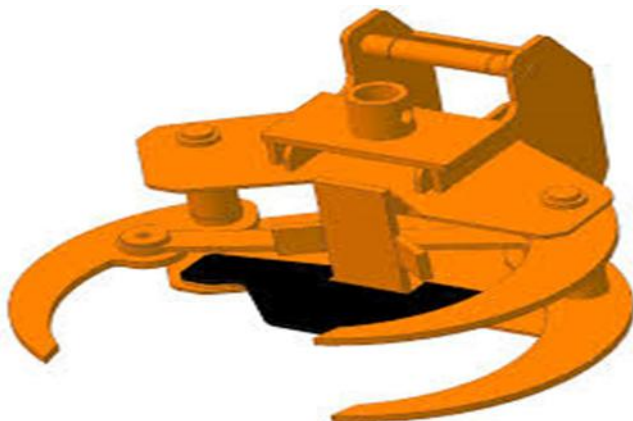
Puunkäyttö energianlähteenä on lisääntynyt 2000-luvun ajan. Polttoon ja puun käsittelyyn liittyvää tekniikkaa on käytetty esimerkiksi sahoilla jo vuosikymmenten ajan. Etenkin energiapuunkorjuu on kehittynyt, koska energiapuun erillisestä myynnistä on tullut osa metsänhoitoa ja puukauppaa. Lämpölaitoksissa käytettävä puu täytyy ennen polttoa saattaa kattiloille ja syöttölaitteille sopivaksi ja-keeksi. Menetelmissä on eroja riippuen energiaksi käytetystä materiaalista ja sen sijainnista voimalaitoksiin nähden. Energiapuristimen suunnittelussa tulee ottaa huomioon nykyinen tekniikka sekä käytettyjä menetelmiä etuineen ja haittoineen

3.1 Energiapuun korjuu

Energiapuuta korjataan pääosin harvestereilla, joilla suoritetaan muitakin hakkuita. Energiapuuta korjataan myös traktoreista rakennetuilla harvestereilla. Traktorin etu varsinaiseen harvesteriin verrattuna on sen kevyempi paino ja ketteryys tiheässä metsässä.

Käytössä on myös kaivinkonealustalle rakennettuja energiapuun korjuukoneita. Kaivinkoneen etuna voidaan pitää 360 asteen työaluetta. Suurin haitta on kaivinkoneen soveltumattomuus vaativiin korjuuolosuhteisiin. Tämän takia telarakenteen vaatimat muutokset ovat olennainen kustannustekijä, kun kaivinkonetta verrataan harvesteriin.

Suurin erottava tekijä määrämittaisen- ja energiapuunkorjuun välillä on hakkuupää. Määrämittaan pyrkivässä harvennus ja päätehakkuussa puu katkaistaan pääosin ketjusahalla, kun taas energiapuun korjuussa päämenetelmä on giljotiinikatkaistu.



KUVA 1. Tyypillinen giljottiini tyypinen hakkuupää

Giljotiinikatkaistun etu sahakatkaisuun verrattuna on sen kyky sietää paremmin epäpuhtauksia, kuten maa-aineksia ja rautaa. Giljotiinikoura voidaan varustaa keräyspihdeillä, jolloin on kyse joukkokäsittelystä. Joidenkin valmistajien giljotiinikourissa on myös syöttö ja karsinta ominaisuus. Karsivan menetelmän etu on puun kuoren rikkoutuminen, minkä vuoksi kuivuminen nopeutuu pelkkään katkaistuun verrattuna. Puun kuivumisen nopeutuminen on tärkeää energiapuun kiertonopeuden kannalta.

Lisäksi on arvioitu, että karsittujen oksien jättäminen metsään kasvattaa etenkin köyhän maaperän ravinteisuutta.

3.2 Haketus ja murskaustekniikka

Energiapuu pitää muuttaa kokorungosta jaekooltaan pienempään muotoon, jotta sen polttaminen on mahdollista voimalaitoksessa. Suurin syy jaekoon pienentämiseen on puun käsittely voimalaitosten syöttölaitteissa. Syöttölaitteiden toiminta perustuu siihen, että poltettava materiaali on tasalaatuista. Lisäksi tasalaatuinen raaka-aine takaa paremman palamisprosessin ja tehostaa logistiikkaa. Haketuksen ja murskauksen käyttökohteet riippuvat käsiteltävästä raaka-aineesta sekä voimalaitoksen koosta ja kattilatyypistä. Haketus- ja murskaustekniikasta löytyviä teknisiä ratkaisuja on mahdollista soveltaa myös energiapuupuristimessa.

Haketus on otettu käyttöön puunjalostusteollisuudessa ennen puun laajempaa käyttöä voimalaitoksissa. Sahoilla puun kuorimisen yhteydessä saatava kuori, sekä sahauksesta yli jäävä puutavara on hyödynnetty sahojen omana energianlähteenä tai sellun raaka-aineena. 1980-luvulla hakkeen käyttö alkoi yleistyä myös suurten maatilojen ja teollisuushallien lämpöenergian lähteenä. Samaan aikaan markkinoille tuli myös pienempään käyttötarpeeseen soveltuvia hakkureita.

Haketus menetelmänä perustuu leikkaavaan terän käyttöön. Myös terän pyörimisnopeuden on oltava melko suuri jotta leikkautuminen tapahtuu. Hakkureita on monenkokoisia ja erilaisiin käyttötarpeisiin suunniteltuja. Hakkurit voidaan jakaa terätyypin mukaan kolmeen eri pääryhmään rumpu, laikka ja ruuvihakkureihin.

3.2.1 Rumpuhakkurit

Rumpuhakkureissa terät on kiinnitetty lieriömäisen rummun ympärille. Rummun halkaisija vaihtelee 400 mm:sta yli 1000 mm:in rummun pituuden ollessa 500 - 1500 mm. Pyörivät terät leikkaavat syötettävää puuta kuljettimen alapinnan tasolla olevaa vastinterää vasten. Haketta kerääntyy rummussa terän alla oleviin terätaskuihin, joista se purkaantuu seulaverkon läpi haketta eteenpäin syöttävälle heittokuljetimelle. Lähes kaikki ammattikäytössä olevat hakkurit ovat rumpuhakkureita.

3.2.2 Laikkahakkurit

Toinen hakkurityyppi on laikkahakkuri. Laikkahakkureissa on kiekko, johon on kiinnitetty säteen suuntaisia teriä. Haketettava puu syötetään vinottain kohti kiekkoa, jolloin leikkautuminen tapahtuu. Suurin osa pienhakkureista on laikkahakkureita, koska laikkahakkuri on edullisempi valmistaa kuin rumpuhakkuri. Laikkahakkurin terät ovat herkemmat epäpuhtauksille kuin rumpuhakkurissa.

3.2.3 Ruuvihakkuri

Kolmas hakkurityyppi on ruuvihakkuri. Ruuvihakkurissa haketettava materiaali syötetään kartiomaiselle ruuville, joka hakettaa syötetyn puun. Muihin hakkurityyppeihin verrattuna ruuvihakkuri vaatii

tehoa enemmän tuottoon ja kokoonsa nähden, koska ruuvin leikkauspinta-ala on suhteessa suurempi esimerkiksi rumpuhakkuriin verrattuna.

3.3 Kuljetinlaitteet

Haketettavan materiaalin syöttö leikkaavalle terälle tapahtuu kuljettimen avulla. Pienissä hakkureissa ei ole välttämätöntä käyttää erillisiä kuljettimia vaan haketettava puu syötetään suoraan syöttörullien läpi leikkavalle terälle. Hakkureissa kuljettimet voivat olla erityyppisiä rulla, ketju tai mattokuljettimia.

3.3.1 Eri kuljetintyypit

Teräsmattokuljetin on yleisin kuljetintyyppi hakkureissa. Teräsmattokuljettimen etu rullakuljetimeen verrattuna on sen kyky kuljettaa hakettava oksainen puu takertumatta syöttörulliin. Rullakuljetin soveltuu parhaiten oksattomalle materiaalille, kuten sahauksessa syntyvälle pintalaudalle.

3.3.2 Syöttölaitteet

Kuljetinpöydän jälkeen haketettava materiaali ajetaan syöttötelojen läpi, jotka syöttävät puun varsinaiselle terälle. Ylempi syöttörulla on halkaisijaltaan alemmaa syöttörullaa suurempi. Hakkurin syöttöaukko on joustava, eli syöttötelaa painetaan hydraulisesti syötettävää materiaalia vasten. Suuremman puun tullessa syöttötelalle, syöttökita suurenee kun taas pientä puuta syötettäessä syöttörulla puristaa puunipun syöttöpöytää vasten. Hakkurin häiriöttömän toiminnan kannalta on välttämätöntä saada puu pysymään tukevasti puristettuna syöttöpöytää vasten, kun se syötetään nopeammin pyörivälle leikkaavalle terälle.



KUVA 2. Jenz -hakkuri (Ammattilehti)

Kuvasta 2 nähdään tyypillinen rumpuhakkurin syöttöpöydän rakenne ja ylempi syöttörulla. Ylemmän syöttörullan alapuolella on yksi tai useampi kiinteä pienempi rulla.

3.4 Murskaus ja murskaimet

Murskausmenetelmä perustuu puun rikkomiseen tylpällä terällä. Murskain ei leikkaa puuta kuten hakkuri, vaan puu särkyä pyörivän terän iskusta ja puristuksesta. Murskaimet voidaan luokitella pyörimisnopeuden tai syöttötavan perusteella.

3.4.1 Vasaramurskaimet

Yleisin murskauksessa käytettävä tyyppi on vasaramurskain. Vasaramurskaimen terärumpu on samankaltainen kuin rumpuhakkurissa, mutta terät ovat lyhempiä vasaran omaisia ja ne ovat sijoitettuna eri puolille rumpua. Hakkurin terärumpu on rakenteeltaan ontto, kun taas murskaimen terärummun rakenne on umpinainen. Raaka-aineen syöttö vasaramurskaimeen tapahtuu yleisesti vaakatasossa kuten hakkureissakin ja syöttökuljetinratkaisut ovat samantyyppisiä kuin hakkureissa.

3.4.2 Pystysyöttöinen vasaramurskain

Pystysyöttöinen vasaramurskain, toiselta nimeltään kaukalomurskain, on rakenteeltaan kaukalomainen. Keskellä on pystyakselin suuntainen terärumpu, joka murskaa syötettävän materiaalin ulkokehällä olevia vastateriä vasten. Erillistä syöttörullastoa ei tarvita, koska murskattava materiaali syötetään suoraan murskauskaukalo. Pystysyöttöinen murskain soveltuu parhaiten lyhyemmän ja kiinteämmän materiaalin, kuten kantojen tai rakennusjätteen murskaukseen. Pitkän kokopuun syöttö on hankalaa, koska puu pyrkii kääntymään vaakasuuntaan ja se jää pyörimään terän päälle.

3.4.3 Hidaskierrosmurskaimet

Hidaskierroksisen murskaimen teräratkaisu on telastotyyppinen. Hidaskierroksiseen murskaimeen materiaali syötetään pääasiassa päältäpäin. Hidasmurskaimessa on limittäin pyöriviä teloja, joihin on kiinnitetty puuta murskaavia teräpaloja. Puu murskautuu joutuessaan telaston väliin.

Murskainten etu hakkureihin verrattuna on suurempi kyky sietää puun mukana tulevia epäpuhtauksia, koska terien ei tarvitse leikata puuta. Lisäksi murskaimella pystytään murskaamaan lähes kaikenlaista puuta, rangasta purkujätteeseen. Murskattu puumateriaali ei välttämättä sovi käytettäväksi pienemmissä voimalaitoksissa, koska murskatusta raaka-aineesta ei ole mahdollista saada yhtä tasalaatuisia kuin hakkeesta. Erikokoisen ja pitkäkuituisen jakeen takia murskatun puun käyttö saattaa aiheuttaa ongelmia syöttölaitteissa ja heikentää kattilan hyötysuhdetta. Murskaimella ei päästä yhtä taloudelliseen tulokseen kuin hakkureilla, koska murskaus vaatii enemmän tehoa verrattuna puun leikkaamiseen. Tästä syystä murskaimet ovat kokoluokaltaan melko suuria ja koko rajoittaa niiden käyttöä huonoissa olosuhteissa. Siksi murskaus tapahtuu lähes aina terminaaleissa tai käyttöpaikalla.

3.5 Logistiikka

Energiapuun sijainnin ja lajin mukaan käytetään erilaisia logistisia ratkaisuja. Puun kuljetustapaan ja käytettävään murskaus- tai haketuskalustoon vaikuttavat raaka-aineen määrä, sijainti voimalaitoksesta sekä raaka-aineen tyyppi. Seuraavassa käsitellään eri kuljetusvaihtoehtoja sekä paikkoja, joissa haketus ja murskaus tapahtuvat.

3.5.1 Tienvarsihaketus

Tienvarsihaketuksella tarkoitetaan suoraan metsästä ajetun puukasan vieressä tapahtuvaa haketusta. Tienvarsihaketuksessa kalusto on usein kevyttä, kuten traktorivetoisia tai kuorma-auton päälle rakennettuja hakkureita. Valmis hake siirretään suoraan voimalaitoksen varastoon. Haketukseen tulee välttämättä taukoja, koska kuljetusmatkat ovat tavallisesti kymmeniä kilometrejä. Normaalisti hake kuljetetaan yhdestä kolmeen täysi- tai puoliperävaunu kuorma-autolla. Haketta voidaan myös tehdä odotusaikana vaihtokoriin, mutta on lähes väistämätöntä että haketuskapasiteettia jää kuljetusten aikana käyttämättä.

Tienvarsihaketus on todettu edullisimmaksi vaihtoehdoksi, kun hakettava materiaali on runkoläpimitaltaan alle 10 cm. Tienvarsihaketuksessa ei muodostu merkittäviä kustannuseroja, oli hakettava puu kokopuuta tai karsittua rankaa. Tienvarsihaketuksen kannattavuus perustuu siihen, että materiaali kuljetetaan suoraan käyttöpaikalleen voimalaitokseen, jolloin säästytään ylimääräiseltä kuormaukselta.

3.5.2 Terminaalihaketus ja murskaus

Terminaaliin on kuljetettu suuremmalta alueelta erilaista energiakäyttöön soveltuvaa puutavaraa. Terminaalissa voi olla kokopuuta, kantoja tai jopa rakennusjätettä. Terminaalissa on taloudellista käyttää suurempaa ja tehokkaampaa kalustoa kuin tienvarsihaketuksessa. Tavallisesti kantojen ym. suuremman puumateriaalin haketus tai murskaus tapahtuu terminaalissa, sillä murskauskaluston koko rajoittaa niiden käyttöä vaikeiden kulkuyhteyksien päässä. Terminaalissa tapahtuva haketus ja murskaus palvelevat useimmiten ison voimalaitoksen energiantarvetta. Terminaalit voidaan sijoittaa voimalaitosten välittömään läheisyyteen, jolloin kuljetusmatka ei muodostu liian pitkäksi. Tehokkaan haketus tai murskainkaluston käyttöaste saadaan paremmaksi, kun kuljetuskapasiteettia voidaan lisätä, koska kuljetettavaa on enemmän.

Hakettava ja murskattava materiaali kuljetetaan terminaaliin tavallisesti täysperävaunullisella kuorma-autolla. Kuormakorin tyyppi on tavallisesti umpinainen, koska käsiteltävä materiaali ei pysy tavallisten puutavarapankkojen välissä. Haketuksen tai murskauksen jälkeen materiaali kuljetetaan voimalaitokseen purkavalla hakekuorma-autolla.

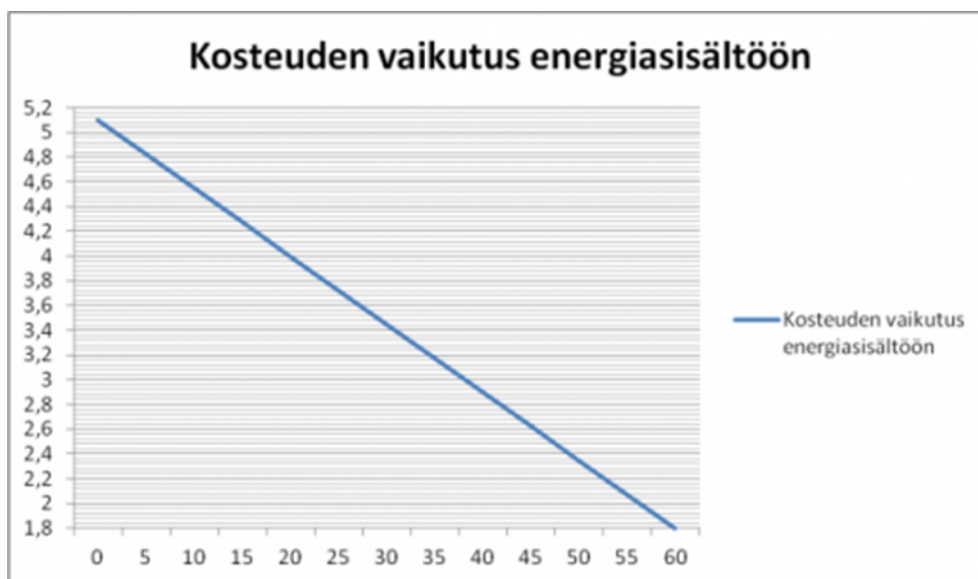
Terminaalihaketuksen ja murskauksen kannattavuuteen vaikuttaa raaka-aineen sijainti voimalaitokseen nähden, sillä terminaalissa tapahtuva ylimääräinen kuormauskerta vaikuttaa siihen olennaisesti. Terminaalihaketuksen ja murskauksen etu tienvarsihaketukseen verrattuna saavutetaan, jos samalla

alueella jouduttaisiin käsittelemään runsaasti pieniä puumääriä. Tällöin energiapuun siirto terminaalien tulee halvemmaksi kuin haketuskaluston liikkuttelu pienten kohteiden välillä (Laitila & Väättäinen 2011). Terminaalia voidaan myös täyttää joustavasti, esimerkiksi ennen sivuteiden kelirikkoa. Samat lähtökohdat pätevät myös käyttöpaikalla tapahtuvaan haketukseen ja murskaukseen, jossa käyttöpaikka toimii terminaalina.

3.6 Kiertonopeus

Energiapuun kiertonopeudeksi kutsutaan aikaa, joka kuluu puun korjuusta polttoon. Pääoman sitoutumisen kannalta voidaan energiapuun toimitusprosessin ja puunkierroa katsoa alkavan puunostohetkestä. Energiapuun kiertonopeuteen vaikuttavat korjuumenetelmä, korjuuajankohta sekä energiantarve yleisesti. Energiapuun kiertonopeutta säätelevät siis lähinnä puun kuivamiseen kuluva aika.

Mitä kuivempaa poltettava puu on, sitä enemmän puusta saadaan tuotettua energiaa, eikä energiaa kuluteta kostean puun kuivattamiseen. Kuviossa 1 nähdään kosteuden vaikutus puun energiasisältöön. Vaaka-akselilla kuvataan puun kosteusprosenttia ja pystyakseli kuvaa puun energiamäärää suhteessa painoon (kWh/kg).



KUVIO 2. Kosteuden vaikutus energiasisältöön (VTT.)

Korjuumenetelmällä voidaan vaikuttaa lähinnä puunkuoren rikkoutumiseen, mikä nopeuttaa puun kuivumista. Kun edulliseen korjuumenetelmään yhdistetään paras korjuuajankohta, voidaan puun kiertonopeutta parantaa. Joskus polttoaineen välitön tarve voi jouduttaa puun kiertonopeutta, mikä johtaa liian kostean puun polttamiseen. Tämä vaihtoehto pienentää siis vain näennäisesti kiertonopeutta. Karkeasti voidaan arvioida riittävän lämpöarvon takaavaksi kiertonopeudeksi 1,5 - 2 vuotta. Tätä pidempi varastointiaika voi aiheuttaa lahoamista, jolloin lämpöarvo heikkenee. Energiapuun hankintaprosessi sitoo runsaasti pääomia, ja se on herkkä valtion ohjaaman tukipolitiikan muutoksille. Siksi on tärkeää tutkia kiertonopeuden parantamista.

4 ENERGIAPUUNPURISTIMEN SUUNNITTELUN PERUSTEET

Energiapuun haketus- ja murskaustekniikka on säilynyt lähes muuttumattomana viimeisen 20 vuoden ajan. Rinnalle ei ole löydetty uusia menetelmiä. Pelletin valmistus perustuu puristamiseen, mutta raaka-aine on puru ja laitteistot ovat monimutkaisia ja hankalasti liikuteltavissa. Metsässä tapahtuva kokopuun paalaus on tulossa energia-alalle. Alalla käytettävät menetelmät uudistuvat hitaasti, joten vasta tulevinä vuosina nähdään, saako kokopuun paalaus jalansijaa energiapuun korjuussa.

Tässä työssä käsiteltävän energiapuunpuristimen lähtökohtana voidaan pitää ajatusta omakotitalokäyttöön tarkoitetusta puristimesta, jolla pystyttäisiin puristamaan pientä oksaa ja muuta poltettavaa jätettä. Myöhemmin ideaa on jatkettu suuremman kokoluokan puristimeen, jolla voisi puristaa kokopuusta yhtenäistä helposti käsiteltävää puristetta. Lopputuote olisi valmis käytettäväksi voimalaitoksessa.

4.1 Suunnittelun lähtökohdat

Markkinoilla ei ole tällä hetkellä kokopuun puristamiseen pohjautuvaa menetelmää. Käytössä olevat puristusmenetelmät eivät pellettiä lukuun ottamatta tähtää energianlähteen syntymiseen. Pelletin valmistusmenetelmä on teollinen, eikä se suoraan sovellu käytettäväksi kokopuulla muuttuvissa olosuhteissa. Energiapuristimen kohdalla käsiteltävää massaa on paljon, jolloin puristimelta odotetaan vastaavaa tehokkuutta muihin menetelmiin nähden.

4.1.1 Puristettava raaka-aine

Määriteltäessä puristettavaa raaka-ainetta voidaan karkeasti määritellä myös puristimen kokoa ja kapasiteettia. Puristettavan raaka-aineen tulisi olla kokopuuta, karsittua rankaa tai oksamassaa. Puristusmenetelmän soveltuvuudesta käytäntöön ei ole kokemuksia, joten puristeen valmistus määritellään käytännön kokeilla.

Eri puulajien sekä erilaisen raaka-aineen puristumiseen voidaan vaikuttaa myös esimurskauksella. Esimurskauksen tavoitteena on saada raaka-aineesta mahdollisimman homogeenista. Puristimelle syötettävä jae, kuten esimerkiksi havupuun oksat, vaativat puristimelta runsaasti voimaa, jotta valmis puriste saadaan syntymään.

Puristettava raaka-aine vaikuttaa olennaisesti myös puristimen työn tehokkuuteen. Tavoitteena on käyttää raaka-ainetta, jota korjataan energiapuukohteilta ja jonka käsittely on vaikeaa pienen runkoläpimitan vuoksi. Siksi puristimen tehokkuus olisi parhaimmillaan puristettaessa läpimitaltaan alle 15 cm puussa. Puristimen suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös läpimitaltaan suuremman puuraaka-aineen käyttö hetkellisesti. Energiapuukohteista korjattu puu on tavallisesti läpimitaltaan 5 cm - 20 cm. Toimiessaan puristin kuitenkin mahdollistaa myös läpimitoiltaan pienemmän raaka-aineen käytön.

Puristimen suunnitteluun on haettu tukea nykyisten haketus ja murskaus menetelmien teknisistä ratkaisuista. Esimurskauslaitteiston suunnittelussa olemassa olevan tekniikan hyödyntäminen on mahdollista, mutta kokopuun puristustekniikkaan ei ole valmista ratkaisua. Siksi puun puristumista on määriteltävä kokeellisesti, jotta saadaan selville, onko menetelmä mahdollista toteuttaa laajemmin.

4.1.2 Tekniset sovellukset

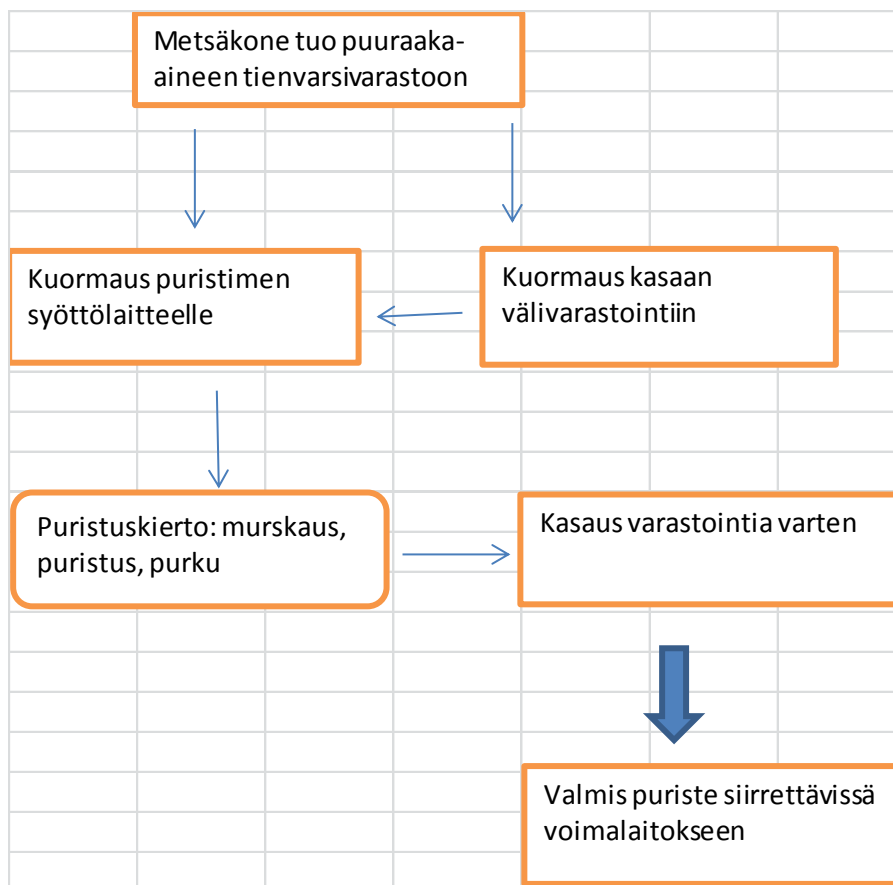
Puristimen teknisen suunnittelun tueksi on selvitetty murskain- ja haketustekniikassa käytettyjä teknisiä ratkaisuja. Puun syöttö-, kuljetus- sekä murskausmenetelmiin on mahdollista soveltaa jo käytössä olevia ratkaisuja.

Murskauksen tavoitteena on saada puristettavastan raaka-aineen rakenteesta mahdollisimman tasalaatuinen. Laadukkaan puristeen syntymisen edellytys on että puristusvaiheessa kaikki puu puristuu tasaisesti, jolloin puristeeseen ei pääse muodostumaan alueita, jotka eivät ole puristuneet yhteen. Puristaminen olisi mahdollista kokopuusta myös yhdellä kerralla, mutta tämä aiheuttaa ongelmia puristimen syöttölaitteiden rakenteeseen koska kokopuun pitäisi syöttää puristimelle puun kuormauksen yhteydessä. Puun syöttömekanismia voitaisiin verrata esipuristimeen, joka työntää epätasalaatuista puuta suoraan puristinkammioon. Tällöin raaka-aineen tiivistäminen vaatii runsaasti tehoa sekä esipuristimelta että varsinaiselta työpuristimelta.

Murskaimen rakenteessa tulee ottaa huomioon keskenään erilaisen puuraaka-aineen käyttö, joka tulee murskaimelle samanaikaisesti. Tärkein murskaimen vaatimus on kyky murskata raaka-aine mahdollisimman tasalaatuiseksi. Jos puristettavan materiaalin jaekoko on liian epämääräinen, se kasvattaa tarpeettomasti puristussynterin vaatimaa tehoa.

4.2 Puun kierto puristamisprosessin yhteydessä

Raaka-aineen käsittely ennen puristamista ei eroa haketusta tai murskausta edeltävästä työstä. Merkittävin ero puristamisen ja haketuksen välillä on, että puristaminen on mahdollista tehdä heti, kun energiapuu ajetaan metsästä tienvarsivarastoon. Haketuksessa ja murskauksessa syntyy valmis lopputuote, joka tulee toimittaa samanaikaisesti käyttöpaikalleen. Tätä ennen haketettavaa tai murskattavaa puuta pitää kuivattaa toisin kuin puristettaessa. Puristamisen yhteydessä puusta vapautuu kosteutta, jolloin kuivuminen nopeutuu. Tällöin puun ja puristeen varastointi aika lyhenee merkittävästi. Puristamisella olisi mahdollista nopeuttaa kiertonopeutta, koska parhaimmillaan ylimääräistä varastointiaikaa ei tarvittaisi lainkaan verrattuna nykyisiin menetelmiin.



KUVIO 3. Puristusprosessi

4.3 Puristusmenetelmän hyödyt ja haitat

Puristusmenetelmällä saavutettavia hyötyjä ja haittoja ei pystytä tässä vaiheessa arvioimaan kuin olettamusten perusteella. Vertailumenetelminä käytetään haketusta ja murskausta sekä niihin liittyvää logistiikkaa. Kun puristusmenetelmän hyödyt ja haitat tunnetaan paremmin, voidaan määrittää tarkemmin puristusmenetelmän käyttökohteet ja soveltuvuus eri logistisiin vaihtoehtoihin. Alustavasti on arvioitu, että puristusmenetelmän hyödyt tulevat parhaiten esiin, kun käsiteltävät puumäärät ovat pieniä. Tällöin energiapuun haketukseen ja murskaukseen on tarpeetonta käyttää suurta tehoa vaativaa haketus- tai murskauskalustoa.

Sama pätee myös logistiikkaan. Valmis puriste voidaan kuljettaa käyttöpaikalleen joustavassa aikataulussa. Parhaimmillaan kiinteän puristeen tulisi mahdollistaa kuljetus esim. puutavarapankoin varustetulla yhdistelmällä. Näin puristeita voisi käyttää meno- ja paluukuljetusten osana.

Puristusmenetelmän haittana voidaan suunnittelun tässä vaiheessa mainita sen hitaus muihin menetelmiin verrattuna. Tulee kuitenkin muistaa että puristusmenetelmän ajatus on, että sillä saavutetaan säästöä energiankulutuksessa sekä laitteiston tehokkaampaa hyötykäyttöä.

5 PURISTIMEN ESISUUNNITTELU

Energiapuristimen suunnitelun tueksi on etsitty sovellusvaihtoehtoja tällä hetkellä käytössä olevista haketus ja murskauslaitteista. Esisuunnittelussa pyritään löytämään parhaiten puristusmenetelmään soveltuvat tekniset vaihtoehdot, joita voidaan hyödyntää prototyypin valmistuksessa. Puristimen osalta on tärkeää löytää toimiva malli puun syöttämiseksi puristimeen sekä määrittää puristimen rakenne.

5.1 Puun syöttö, esimurskaus ja kuljetus

Ennen puristusprosessia puu on esimurskattava. Esimurskaus on välttämätöntä, jotta materiaalista saadaan riittävän tasalaatuista. Kokorangan puristaminenkin olisi teoriassa mahdollista, mutta tällöin raaka-aineen syöttö puristimelle muuttuu haastavaksi, rangan pituuden ollessa vähintään kolme metriä. Jos puristettava raaka-aine on korjattu kokopuu menetelmällä eli puu on karsimatonta, on kerralla puristaminen vielä vaikeampaa koska oksat haittaavat syöttöä. Erilaisia esimurskaimen teknisiä vaihtoehtoja tarkastellessa, nousee esiin kaksi päävaihtoehtoa. Jatkuva syöttöinen telatyypin murskaus sekä puristamiseen perustuva jaksottainen leukamurskaus.

5.1.1 Telamurskaus

Telamurskauksessa puu syötetään murskaustelaston läpi. Telasto voi koostua yhdestä tai useammasta telaparista. Mikäli telapareja on useampia ne vaativat monimutkaisemman voimansiirron. Voimansiirto olisi mahdollista toteuttaa ketjuvedolla. Ratasveto on käyttökohteeseensa kallis ja vaurioherkkä vaihtoehto. Useamman telaparin vaihtoehdossa telojen tyyppi voitaisiin pitää yksinkertaisempaan, koska raaka-aine murskautuu vähitellen edetessään telastossa. Mahdollisena riskinä voidaan pitää tukosten syntymistä telastoon ja puu raaka-aineen kietoutumista telojen ympärille.

Yhden telaparin mallissa raaka-aineen pitää murskautua kerralla puristettavaan muotoon. Tässä tapauksessa telaparin murskauskyykyyn ja murskainterien kehitykseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Itävaltalainen murskainvalmistaja käyttää murskaimessaan teloja, joiden profiili on ruuvimainen. Ruuvien ulkokehälle on kiinnitetty kovametalliteriä, jotka murskaavat raaka-aineen vastinteriä vasten. (Kuva 4.) Jos murskaus pystytään hoitamaan yhdellä telaparilla, voidaan telojen vaatima voima tuottaa suoraan hydraulimoottorilla. Komptechin valmistama murskain on tarkoitettu lähinnä kantojen ja rakennusjätteiden murskaukseen. Murskattava raaka-aine syötetään telastolle päältäpäin, joten erillistä syöttökuljentinta ei tarvita. Kyseinen syöttötapa soveltuu paremmin pituusmitaltaan lyhemmän raaka-aineen murskaukseen.



KUVA 3. Komtech –murskaimen telasto (Kärkimurskaus Oy.)

5.1.2 Leukamurskain

Leukamurskaimia käytetään erityisesti kiviainesten murskaukseen. Koska murskattava aine on kovaa, jatkuva murskautuminen ei ole mahdollista. Siksi leukamurskauksessa murskautuminen tapahtuu jaksottain.

Murskainterä voi olla hitaasti pyörivä rulla johon on kiinnitetty murskaavat leuat jotka murskaavat puun tullessaan ala-asentoon. Tämä vaihtoehto muistuttaa muuten telamurskausta, mutta murskausprosessi on jaksottainen. Vaihtoehtoisesti murskain voi olla pystysuunnassa liikkuva murskainleuka, joka liikkeensä lopussa murskaa raaka-aineen vastinpintaa vasten. Tämän jälkeen syöttökuljetin liikuttaa murskattavaa raaka-ainetta eteenpäin. Leukamurskaimen etuna on yksinkertaisempi rakenne telamurskaimeen nähden, sillä monimutkaisia voimansiirtorakenteita ei tarvita. Lisäksi puristettavan raaka-aineen murskautuminen jatkuu vielä muun prosessin yhteydessä, joten vaatimukset esimurskatun raaka-aineen laadulle eivät ole niin suuret.

5.1.3 Puun syöttö murskaimelle

Energiapuristimella puristettava puu on pääasiassa nuorenmetsän hoitokohteista korjattua läpimitaltaan pientä puuta. Korjuumenetelmittäin puun pituusmitta vaihtelee kolmesta metristä enimmillään kuuteen metriin. Tämän takia puu pitäisi syöttää murskaimelle tyvi- tai latvapää edellä. Syöttöpöydän rakenteena voidaan käyttää hakkureissa ja murskaimissa käytettyä teräslamellikuljetinta. Teräslamellikuljettimen suurin etu rullakuljettimeen verrattuna saavutetaan pieniläpimittaisella ja oksaisella puulla, koska rullakuljettimen suurin riski on, että puun latvukset ja oksat alkavat kietoutua rullien väliin ja aiheuttaa toimintahäiriöitä.



KUVA 4. Teräslamellikuljetin (Biomassehof-wonneberger)

Ennen puun saapumista murskaus- tai haketusterille valmistajat käyttävät syöttörullaa, jonka päätehtävä on painaa raaka-aine tiivimmin syöttöpöytää vasten. Tämä on välttämätöntä, jotta puut pysyvät paikallaan, kun niitä painetaan haketus- tai murskausterää vasten. Syöttörulla ei välttämättä tarvitse vetoa, koska syöttökuljetin työntää puuta eteenpäin. Syöttökidan tulee kuitenkin päästä liikumaan, koska syötettävän puumassan määrä vaihtelee. Syöttökidan painatus toteutetaan hydraulisylintereillä, joiden paine on säädetty siten, että ne painavat sopivalla voimalla raaka-ainetta syöttökuljetinta vasten.

5.1.4 Murskainterien rakenne

Energiapuun murskaus ennen puristusta on suunniteltu tehtäväksi hitaasti pyörivän murskaustelaston avulla. Tavoitteena on, että puristusmenetelmällä saavutetaan säästöä kokonaisprosessin energiankulutuksessa. Siksi ei ole tarpeen että puristettava raaka-aine olisi laadultaan vastaavaa kuin hake tai puumurske. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että puun murskautuminen jatkuu vielä puristusprosessin yhteydessä.

Murskaimen kapasiteettia mitoittaa eniten varsinainen puristusprosessi. Murskaimen ei tarvitse tuottaa puristettavaa raaka-ainetta sen enempää mitä puristin pystyy työkierrossaan kerrallaan hyödyntämään.

Esisuunnittelu ja prototyyppivaiheessa tulisi löytää sellainen murskainterien malli, jolla saataisiin puristettavaksi soveltuvaa raaka-ainetta. Suunnitelun lähtökohtana voidaan käyttää Komptechin valmistaman murskaimen murskaintelastoa. Energiapuristimen murskaustelat olisivat kuitenkin päällekkäin, niin että puu syötetään tyvi tai latva edellä murskaimeen. Seuraavaksi puu murskautuu vastinterien

ja murskaimenteloissa olevien terien välissä. Lisäksi on tutkittava tarvitaanko murskaintelojen ympärille seulaverkkoa, jonka läpi riittävästi murskautunut aine seuloutuu kuljetettavaksi puristimelle.

5.1.5 Murskeen kuljetus puristimeen

Puristamisen kannalta on olennaista että puristettava raaka-aine saadaan pakattua puristinkammioon mahdollisimman tiiviisti. Vaihtoehtoja raaka-aineen kuljetukselle on mattokuljetin, ruuvikuljetin tai sylinteri joka painaa raaka-ainetta kammioon. Mattokuljettimen etu on sen vähäinen tehontarve, mutta syöttö lieriönmuotoiseen kammioon on haasteellista. Samoin raaka-aineen esipuristus ennen varsinaista puristusta tulisi toteuttaa erillisellä puristimella. Tämä lisää käytettävän hydrauliikan määrää, jolloin tehontarve kasvaa jälleen.

Ruuvikuljettimen avulla saavutettaisiin raaka-aineen tiivistymistä jo syöttövaiheessa. Kiinnittämällä huomiota ruuvin suunnitteluun, olisi mahdollista saavuttaa vielä murskautumista ennen puristuksen alkamista. Lisäksi syöttö lieriön muotoiseen kammioon olisi helpompaa toteuttaa ruuvikuljettimen avulla.

5.2 Puristimen suunnittelu

Puristimen suunnittelun kannalta on tärkeää tietää mitkä asiat vaikuttavat siihen, että murskatusta puuraaka-aineesta saadaan puristamalla koossa pysyvä ja myöhemmän käsittelyn mahdollistava puriste. Puu sisältää ainesosia jotka puristuessaan ja lämmitessään saavat aikaan kuitujen liittymisen toisiinsa. Puristinkammion tulee rakenteellisesti mahdollistaa puristeen irtoaminen ehjänä sekä kammion tasainen täyttyminen. Lisäksi suunnittelussa tulee ottaa huomioon puristimen lämpeneminen puristuksen yhteydessä ja tästä aiheutuva paloturvallisuusriski.

5.2.1 Puun rakenteen vaikutus puristumiseen

Puu rakentuu solutasolla kolmesta eri aineesta: selluloosasta, hemiselluloosasta sekä ligniinistä. Kaikki puulajit sisältävät ligniiniä, jonka määrä vaikuttaa esimerkiksi puun kovuuteen. Ligniini on ongelmallinen aine sellu ja prosessiteollisuudessa, koska se aiheuttaa mm. paperin kellastumista. Tämän vuoksi ligniini täytyy erottaa. Ligniini on kuitenkin merkittävä ainesosa puun energiakäytön kannalta sillä sen lämpöarvo on hyvä.

Ligniini on tärkein aine, kun puusta halutaan koossa pysyvä puriste. Ligniini toimii ikäänkuin liimana, jolla selluloosasäikeet pysyvät kasassa. Jotta puriste saadaan syntymään, tulee ligniini saada irti solurakenteesta, jotta esimurskatut jakeet voivat yhdistyä puristeeksi. Tämä vaikuttaa olennaisesti puristimen tarvitseman puristusvoiman määrittämiseen. Mikäli voima ei riitä saamaan ligniiniä irti, ei ole mahdollista saada tuotteeksi puristetta joka kestäisi myöhemmän käsittelyn. Ligniini tulee ottaa huomioon puristimen teknisessä suunnittelussa, jotta valmis puriste saadaan irrotettua puristussylinteristä ehjänä. Puristeen koossa pysymiseen vaikuttaa myös ligniinin jäähtyminen, sillä lämpötila vaikuttaa ligniinin jähmettymiseen. Tämän vuoksi esimerkiksi pellettipuristimessa on puristamisen

jälkeen tapahduttava välitön jäähdytys jotta pelletti pysyy kasassa. Puun puristumista tarkastellaan käytännön kokeiden yhteydessä tarkemmin. (Kärkönen 2010)

5.2.2 Puristinkammion rakenne

Puristinkammion rakennetta suunniteltaessa tärkeimmät vaatimukset ovat kammion esteetön ja häiriötön täyttyminen ja puristeen irtoutuminen ehjänä kammioista. Lieriömäinen kammion muoto on käytännössä ainut vaihtoehto häiriöttömän toiminnan kannalta. Tällöin puristettava puu ei takerru nurkkiin yhtä helposti kuin suorakaiteen muotoiseen kammioon.

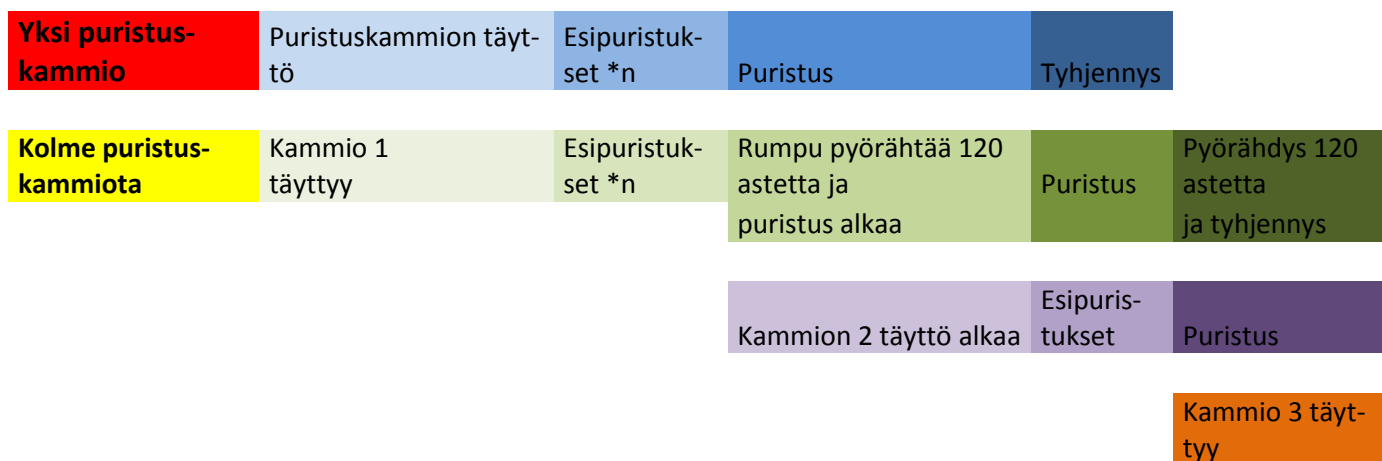
5.2.3 Puristimen työkierto

Puristimen suunniteltu työkierto on seuraavanlainen. Ensin murskattu raaka-aine syötetään kammiin syöttökuljettimella. Mikäli tarve vaatii, puristinsylinteri tekee jo täytösvaiheessa yhden tai useamman esipuristuksen, jotta raaka-ainetta saadaan tiivistettyä. Tämän jälkeen kammioon voidaan syöttää lisää puristettavaa puumursketta. Kun kammiio on täynnä puristettavaa puuta, suljetaan täyttöauko ja puristussylinteri tekee lopullisen puristuksen.

Kun riittävä puristuminen on saavutettu, puristussylinteri työntää valmiin puristeen kammioista ulos. Toinen vaihtoehto olisi sivusta aukeava puristinkammio. Puristinkammion rakenteesta tulisi monimutkaisempi ja kammion rakenteessa tulisi välttää ylimääräisiä saumoja. Siksi suunnittelussa keskitytään ensimmäiseen vaihtoehtoon, jossa kammiio tyhjennetään päädyn kautta.

Tyhjennys hetkellä kammion täyttö/tyhjennys aukko eivät voi olla samassa linjassa. Ongelma voidaan poistaa, kun puristinkammio suunnitellaan pyörivän rummun sisään. Kun rumpua pyöritetään akselinsa ympäri, vapautuu ulkokehälle sijoitetulle puristuskammiolle tyhjennys aukko.

Pyörivä rumpu mahdollistaisi myös työkierron ja puristimen tehokkuuden kasvattamisen seuraavasti. Tällöin rumpu sisältäisi kolme eri puristuskammiota. Käytettävän hydrauliiikan määrä lisääntyy merkittävästi, mutta puristimen hyötykapasiteetti kasvaa, koska yhden työkierron vaiheen aikana voidaan toteuttaa muita työvaiheita.



KUVIO 3. Puristimen työkierto

6 KOETULOKSET

Puristusmenetelmän toimivuutta kokeiltiin testilaitteiston avulla. Kokeiden avulla pyrittiin selvittämään, mitkä tekijät puristettavassa puussa vaikuttavat puristeen syntymiseen ja kuinka suurta puristusvoimaa vaaditaan.

6.1 Testilaitteisto

Puristustestejä varten valmistettiin mätä ja puristuskammiota kuvaava lieriö. Puristimena käytettiin yrityksen särmäyspuristinta, jonka puristusvoima on 250 tonnia. Puristettavan raaka-aineen esimurskaus suoritetaan käsin tai käyttämällä valmista haketta.



KUVA 6. Puristinta kuvaava laite

6.2 Puristettavat puulajit

Puristustesteissä käytettiin kosteudeltaan ja lajiltaan erilaisia puuraaka-aineita. Näin selvitettiin millainen puu olisi puristamisen kannalta paras vaihtoehto sekä samalla pyrittiin löytämään oikea palakoko. Testeissä pyrittiin saamaan myös selville kuinka paljon puusta irtoaa puristuksen aikana kosteutta, mikä olisi yksi puristusmenetelmän eduista.

6.2.1 Tuore lehtipuu

Testeissä käytettiin tuoretta leppää ja koivua. Puuta esimurskattiin särmäyspuristimen terien välissä oikean palakoon saavuttamiseksi.

Kun jakeelle oli saatu riittävä koko, täytettiin puristinta kuvaava laite puumurskeella. Puristuspesä täyttyi murskeesta niin äkkiä, että oli välttämätöntä suorittaa yksi välipuristus. Varsinaisen puristuksen yhteydessä puusta irtosi kosteutta runsaasti. Murskattu puu puristui alkuperäisestä tilavuudesta noin neljäsosaan. Puun tilavuuden muutoksen laskeminen voidaan aloittaa tilanteesta, kun puuta on esipuristettu niin paljon, ettei puumurskeen välissä ole ilmaa.

Tuoreella lehtipuulla havaittiin testeissä merkittävää kosteuden poistumista. Tuoreen puun tehokas palaminen olisi siis ollut täysin mahdollista kosteuden poistumisen jälkeen. Puristuspaine oli liian pieni, jotta tuloksena olisi saatu koossa pysyvä puriste. Yhteen puristumista havaittiin mutta puristeen irrottaminen kammista ehjänä ei osoittautunut mahdolliseksi.

6.2.2 Havupuu hake

Tuoreen lehtipuun jälkeen testejä jatkettiin havupuuhakkeella. Pihkapuun käyttäminen puristeessa voisi lisätä puristeen koossa pysymistä.



KUVA 7. Havupuu hake

Testissä käytetty havupuu hake oli käytännössä polttokuivaa, joten kosteutta ei poistunut niin paljon kuin tuoreesta lehtipuusta. Kuivallakin hakkeella tosin havaittiin jonkinasteista kosteuden poistumista. Puriste pysyi tässäkin tapauksessa koossa siihen asti, kunnes sitä yritettiin irrottaa puristuskammista kuvaavasta lieriöstä. Näin voitiin todeta, ettei testilaitteistona käytetyn särmäyspuristimen kapasiteetti ole riittävä puristeen syntymiseen.

6.3 Päätelmät testitulosten perusteella

Testitulosten perusteella puristamisen paras hyöty saavutettiin tuoreella puulla kosteuden poistumisessa. Yksi puristamismenetelmän ennakoituista hyödyistä oli energiapuun kiertonopeuden parantaminen joten tuoreen puun saattaminen energiakäyttöön nopeammin olisi testitulosten perusteella mahdollista.

Testien perusteella oli tarkoitus määrittää myös koossa pysyvän puristeen syntymiseen vaikuttavaa voimaa mitoituksen perusteiksi. Saatujen havaintojen pohjalta särmäyspuristimen voima 250 tonnia ei riittänyt puristeen valmistumiseen. Oikeana puristusvoimana voidaan tosin pitää 200:aa tonnia, otten huomioon laitteen ikä ja se, että puristus tapahtui puristimen toisessa päässä.

6.4 Jatkokehitys

Energiapuristimen mahdollisen jatkokehityksen tärkein tehtävä on selvittää, minkälaisilla teknisillä ratkaisuilla koossa pysyvä puriste olisi mahdollista valmistaa. Tähän liittyy olennaisesti riittävän puristusvoiman ja paineen ja saavuttaminen. Pelletin valmistukseen liittyvissä tutkimuksissa on havaittu että kokopuun puristumiseen tarvitaan 700 bar paine. Havupuuuhake vaatii yli 1000 bar puristus-paineen (Hyrkäs 2010). Tämä asettaa vaatimuksia puristimen tekniikalle, sillä kyseisen suuruusluo-kan paineiden saavuttaminen hydraulisesti on haastavaa. Pelletöinnissä suurempi paine pystytään saavuttamaan pienempien puristuspinta-alojen avulla. Lisäksi puristuksen aikana tapahtuvalla läm-pötilan kohoamisella tai kohottamisella voidaan vaikuttaa ligniinin irtoamiseen puusta.

Jatkokehityksessä on pyrittävä löytämään sellaiset tekniset sovellukset joilla saadaan aikaan koossa pysyvä puriste. Tällöin pystytään määrittelemään tarkemmin puristimen vaatima tehontarve, tähän sopivat komponentit sekä tekniikka jolla korkea puristus-paine pystytään toteuttamaan. Mikäli puris-te saadaan syntymään, voidaan jo paremmin ottaa kantaa menetelmän taloudelliseen kannattavuuteen. Taloudellinen kannattavuus voidaan jakaa kahteen eri osaan.

-Energiapuristimen valmistuksen kannattavuus

-Menetelmän kannattavuus kokonaisuudessa

Energiapuristimen valmistuksen kannattavuuteen vaikuttaa eniten menetelmän toimivuus kokonai-suudessa. Laitteen hinta tulisi jokatapauksessa olemaan korkea, minkävuoksi menetelmältä odote-taan toimivuutta. Energiapuun ketju metsästä polttolaitokseen on pitkä, joten tarkempien kustan-nusvaikutusten arviointi on vaikeaa tässä vaiheessa. Menetelmän kokonaishyötyjen arviointi on ko-konaan mahdollista silloin, mikäli puristimesta katsotaan järkeväksi rakentaa prototyyppi. Prototyy-pin avulla puristusprosessia pystytään havainnollistamaan, ja se voidaan liittää helpommin osaksi laajempaa kustannusvaikutusten arviointia.

7 YHTEENVETO

Työssä opinnäytetyössä taustoitettiin energiapuristimen jatkosuunnitteluun liittyviä asioita. Työssä tutkittiin alan toimintaympäristöä ja puun käytön historiaa ja nykyhetkeä Suomessa. Työn aikana julkisuudessa on kuultu metsäteollisuudesta positiivisia investointi uutisia. Sellun kysyntä on tällä hetkellä kova ja biotaloudelta odotetaan paljon. Tämä osoittaa sen, että ala elää jatkuvasti ja toimintaympäristön määrittäminen on välttämätöntä ryhdyttäessä uusiin hankkeisiin.

Työssä onnistuttiin selvittämään ja jäsentelemään tarpeellisia lähtötietoja, joita energiapuristimen suunnittelussa ja prototyypin valmistuksessa tulisi ottaa huomioon. Lisäksi löydettiin teknisiä ratkaisuja joita voitaisiin soveltaa puristimessa. Mikäli puristimen jatkokehitys alkaa, tarvitaan myös riittävä rahoitus. Tämä työ antaa tarvittaessa pohjaa energiapuristimen jatkokehityksen ja prototyyppi-valmistuksen rahoitusperusteille.

Vielä tässä vaiheessa on vaikea arvioida, pystytäänkö puristusmenetelemällä saavuttamaan riittäviä taloudellisia hyötyjä nykyisiin menetelmiin verrattuna. Puun puristaminen menetelmänä on kiinnostava jatkotutkimuksen ja kehitystyön kannalta. Työn aikana on herännyt myös uusia ajatuksia menetelmän soveltamisesta eri käyttökohteisiin sekä muiden puristusprosessin välivaiheiden soveltamisesta energia-alalle, eri vaiheiden tehokkuuden parantamiseksi. Tulevaisuudessa on tarkoitus valmistaa pienemmän kokoluokan energiapuristin omakotitalokäyttöön, jolloin on helpompaa tarkastella puristusprosessin eri vaiheita kehitystarpeineen.

Jos Suomi aikoo päästä tavoitteisiin ja tuottaa riittävän määrän uusiutuvaa energiaa, on välttämätöntä etsiä uusiakin vaihtoehtoja ja menetelmiä vanhojen rinnalle. Energia-ala ja biotuoteala ovat tulevaisuutta ja ne tarvitsevat uusia innovaatioita ja kehityssuuntia. Yksi mahdollinen osa tätä tulevaisuutta voi olla energiapuristin.

Lopuksi haluan kiittää lehtori Pertti Kupiaista saamastani tuesta ja mielenkiinnosta työtäni kohtaan sekä Suunnittelutoimisto Kimmeriä mahdollisuudesta valmistaa testilaitteet ja toteuttaa testit yrityksessä.

LÄHTEET

TUTKIJOIDEN METSÄPALAVERI. 2004. Metsienkäytön historia. [Viitattu 2014-10-12.] Saatavissa: <http://www.helsinki.fi/project/metsapalaveri/seminaarit/historia.htm>

TORVELAINEN, Jukka ja AARNE, Martti. 2014-07-09. Metsätilastotiedote 32/2014. [Viitattu 2014-10-18] Saatavissa: <http://www.metla.fi/tiedotteet/metsatilastotiedotteet/2014/kaytto13.htm>

SUOMEN SAHAT RY. 2013. [Viitattu 2014-11-05] Saatavissa: <http://www.suomensahat.fi/>

SUOMEN METSÄYHDISTYS. 2012. Metsänomistus [Viitattu 2014-11-06] Saatavissa: <http://www.smy.fi/>

MAA-JA METSÄTALOUSHALLITUS. 2014-12-09. Hakkuutähteistä ja metsäteollisuuden sivutuotteista saadaan energiaa. [Viitattu 2014-12-20] Saatavissa: http://www.mmm.fi/fi/index/etusivu/metsat/ilmasto_energia/puun_energiakaytto.html

METSÄKESKUS. 2013. Metsätalouden tuet. [Viitattu 2014-12-15] Saatavissa: <http://www.metsakeskus.fi/metsatalouden-tuet>

AMMATTILEHTI. Sivusyöttöinen Jenz-hakkuri [Valokuva] Saatavissa: <http://www.ammattilehti.fi/uutiset.html?460>

BIOENERGIANEUVOJA. Kosteuden vaikutus energiasisältöön. [Taulukko] Saatavissa: <http://www.bioenergianeuvoja.fi/faktaa/puun-kosteus/>

KÄRKIMURSKAUS OY. Komptech murskain. [Valokuva] Saatavissa: <http://www.karkimurskaus.fi/Murskaimen-toiminta.php>

BIOMASSEHOF-WONNEBERGER. Teräslamellikuljetin. [Valokuva] Saatavissa: <http://www.biomassehof-wonneberger.de>

MTT, Helsingin- ja Oulun yliopisto. 2010. Ligniini liimaa puissa ja heinissä. [Viitattu 2014-12-27] Saatavilla: http://www.helsinki.fi/maataloustieteet/yhteiskunta/dokumentit/Maaseuduntiede04_2010_Karkonen.pdf

HYRKÄS, Jarno. 2010. Kirjallisuuskatsaus, Biomassan pelletointi. [Viitattu 2015-01-23] Saatavilla: http://www.oamk.fi/hankkeet/ekopelletti/docs/pelletti_kirjallisuuskatsaus.pdf